



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS EM
SITUAÇÕES DE INCÊNDIO COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE
CIMENTO POR CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Sabrina de Paula

Lajeado/RS, novembro de 2020

Sabrina de Paula

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS EM
SITUAÇÕES DE INCÊNDIO COM A SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE
CIMENTO POR CINZA DE CASCA DE ARROZ**

Monografia apresentada no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso – Etapa II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador(a): Ma. Débora Pedroso Righi Kohler

Lajeado/RS, novembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, em especial aos meus pais Adilson e Evandra, a minha irmã Maria Eduarda e ao meu namorado Anderson. Por sempre estarem comigo, me incentivarem a ir em busca de meus sonhos, por nunca medirem forças para me ajudar, por toda paciência e dedicação. Sem vocês ao meu lado nada seria possível. Agradeço em especial também à minha orientadora Ms. Débora Pedroso Righi Kohler, pela paciência que sempre teve comigo, pelo empenho, dedicação e pela confiança em mim depositada. Agradeço ao pessoal do LATEC (Laboratório de Tecnologias de Construção) por me ajudarem em todos os procedimentos práticos. Agradeço também a empresa Renomus Joias, pelo forno mufla. E por fim, agradeço à Deus!

RESUMO

A substituição do cimento por cinza de casca de arroz (CCA) é um método que vem sendo cada dia mais pesquisado e estudado, analisando-se suas principais melhorias nas propriedades do concreto a curto e a longo prazo. A CCA é um material pozzolânico com grande potencial de substituição do cimento em concretos, por aumentar sua resistência mecânica e reduzir a porosidade, assim proporcionando uma maior durabilidade e vida útil. O principal objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento mecânico de concretos convencionais com diferentes porcentagens de substituição do cimento por CCA sendo submetidos a situações de incêndio. Todos os materiais utilizados neste estudo passaram por ensaios de caracterização para determinar sua massa específica e granulometria, para que após isso pudesse ser realizada a dosagem do concreto. A CCA utilizada foi adquirida comercialmente, e foi aplicada em diferentes porcentagens de substituição do cimento, sendo elas 5%, 10% e 15%. Posteriormente, foram realizadas análises para determinar as melhorias que esta ocasionou nas características do concreto. Os diferentes traços passaram pelos ensaios de resistência à compressão aos 7, 21 e 28 dias e aos 28 dias foram submetidos ao forno mufla nas temperaturas de 100°C, 300°C e 400°C pelo tempo de 120 minutos para simulação em altas temperaturas, podendo assim ser avaliada qual a perda de resistência nessas condições, conforme o teor de substituição do cimento por CCA. Pôde-se perceber que as resistências dos concretos referência e com 5% de CCA ficaram semelhantes. Quando submetido a elevadas temperaturas, o concreto com 5% de CCA obteve resultados similares ao concreto sem substituição. Além disso, os resultados de absorção de água e índice de vazios demonstram que o concreto sem substituição obteve menores valores para estas propriedades. Por isso, pode-se concluir que o concreto com substituição de 5% comportou-se de forma similar ao concreto referência.

Palavras-chave: Cinza de casca de arroz. Resistência à compressão. Altas temperaturas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Edificações do Império Romano.....	13
Figura 2 – Usina Hidrelétrica de Itaipu.....	14
Figura 3 – Primeiro grande incêndio.....	22
Figura 4 – Incêndio em Londres.....	22
Figura 5 – Incêndio em Chicago.....	22
Figura 6 – Incêndio do Gran Circo Norte-americano.....	23
Figura 7 – Incêndio do Edifício Andraus.....	24
Figura 8 – Incêndio do Edifício Joelma.....	24
Figura 9 – Incêndio do Edifício Andorinha.....	25
Figura 10 – Fluxograma do programa experimental.....	30
Figura 11 – Frasco de Le Chatelier.....	37
Figura 12 – Concretagem dos corpos de prova.....	39
Figura 13 – Corpos de prova concretados.....	40
Figura 14 – <i>Slump Test</i>	41
Figura 15 – Corpos de prova no forno mufla.....	42
Figura 16 – Pesagens do ensaio de absorção e índice de vazios.....	43
Figura 17 – Rompimento dos corpos de prova com a prensa hidráulica.....	45
Figura 18 – Corpos de prova em temperatura ambiente, 100°C, 300°C e 400°C.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resistência dos traços de concreto.....	18
Gráfico 2 – Resistência mecânica aos 28 e 91 dias.....	19
Gráfico 3 – Resistência do concreto com CCA em estado natural.....	19
Gráfico 4 – Resistência de materiais estruturais em elevadas temperaturas.....	20
Gráfico 5 – Resistência à compressão em elevadas temperaturas.....	26
Gráfico 6 – Resistência do concreto em elevadas temperaturas.....	27
Gráfico 7 – Resistência à compressão da CCA.....	28
Gráfico 8 – Resistência dos CPs com CCA em elevadas temperaturas.....	28
Gráfico 9 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	32
Gráfico 10 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	35
Gráfico 11 – Resistência à compressão.....	46
Gráfico 12 – Resistência à compressão dos corpos de prova submetidos a situações de incêndio.....	48
Gráfico 13 – Absorção de água e índice de vazios.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades químicas.....	15
Tabela 2 – Resistência à compressão dos CP aos 28 dias.....	18
Tabela 3 – Limites do módulo de finura.....	33
Tabela 4 – Classificação dos diferentes tipos de brita de acordo com seu diâmetro.....	35
Tabela 5 – Propriedades da CCA.....	37
Tabela 6 – Traços para cada substituição de CCA.....	38
Tabela 7 – Quantidade de material.....	39
Tabela 8 – Relação das resistências dos concretos.....	47
Tabela 9 – Perda de resistência dos corpos de prova.....	50
Tabela 10 – Resistência à compressão simples aos 7, 21 e 28 dias.....	60
Tabela 11 – Resistência dos corpos de prova submetidos ao forno mufla.....	61
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios.....	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
1.2 Justificativa da pesquisa	10
1.3 Estrutura do trabalho	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Materias pozolânicos.....	13
2.1.1 Definição das pozolanas	14
2.1.2 Características e comportamento das pozolanas em Cimento Portland ..	14
2.1.3 Cinza de casca de Arroz.....	15
2.1.4 Utilização da CCA em concretos/argamassas.....	16
2.2 Concretos em situação de incêndio.....	19
2.2.1 Incêndios históricos	20
2.2.2 Comportamento de concretos em situação de incêndio	24
2.2.3 Uso da CCA em concretos em elevadas temperaturas	25
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	29
3.1 Estratégia de Pesquisa	29
3.2 Caracterização dos Materiais	30
3.2.1 Cimento	30
3.2.1.1 Massa específica do cimento.....	30
3.2.2 Areia	31

3.2.2.1 Granulometria da areia	31
3.2.2.2 Massa unitária e massa específica da areia	32
3.2.3 Brita 1	33
3.2.3.1 Granulometria da brita 1	33
3.2.3.2 Massa unitária e massa específica da brita 1	35
3.2.4 Cinza de casca de arroz	35
3.3 Dosagem do Concreto	36
3.4 Slump Test.....	39
3.5 Simulação altas temperaturas	40
3.6 Absorção e Índice de Vazios.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE A – RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA À COMPRESSÃO SIMPLES E SUBMISSÃO AO FORNO MUFLA.....	61
APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, o cimento é a principal substância que é utilizada para a fabricação de concreto estrutural. Este material é misturado juntamente com aglomerante, agregados e água, formando o concreto, cuja principal característica é a sua alta resistência mecânica. Porém, este material traz sérias consequências ao meio ambiente, tendo como principal fator a emissão de dióxido de carbono (CO_2) para o planeta. Isso tudo é resultado da calcinação do calcário e da queima nas etapas de fabricação do clínquer (BARROSO, 2011). Além disso, para a fabricação de cimento o consumo de energia é alto, emitindo grandes quantidades de gases do efeito estufa. Isso quer dizer que é lançada uma tonelada de gases para o meio ambiente a cada tonelada de clínquer produzida (PEREIRA, 2008).

A fim de reduzir a emissão de poluentes, o interesse na utilização de outros materiais como substituto do cimento vem crescendo consideravelmente. Neste caso, podem ser utilizados resíduos industriais e agro-industriais (BARROSO, 2011).

Nos últimos anos, o ser humano vem passando por grandes transformações na produção de alimentos. Por esse motivo, ocorreu um crescimento elevado da transformação de matéria-prima em alimentos que sejam apropriados para consumo, o que implicou também em um o acréscimo considerável na geração de resíduos. Esses resíduos produzidos pela indústria alimentícia podem ser reutilizados de diversas maneiras. Porém o custo é elevado para torná-lo um produto reutilizável, o que gera grandes dificuldades econômicas (SANTOS, 2006).

Segundo Silva (2005), o processo de reciclagem e reutilização vem sendo utilizado para amenizar os impactos causados no meio ambiente, pois desta forma diminui-se os resíduos gerados. Dentro deste contexto, os materiais pozolânicos, que são provenientes de reciclagem ou reutilização, incorporados ao concreto trazem grandes benefícios, podendo-se citar a durabilidade do produto e melhora nas propriedades mecânicas. Citam-se como exemplos de adições minerais utilizadas no concreto a cinza volante, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, escória de alto-forno e a cinza de casca de arroz (CCA) (BARROSO, 2011).

A aplicação da CCA como material pozolânico auxilia na redução da poluição do meio ambiente, gerando economia de energia na produção do clínquer de cimento. Em contrapartida, é necessário qualificar quais são os teores de substituição adequados para que seja produzido um concreto de qualidade. Além disso, deve-se entender qual é o grau de moagem adequado e a sua temperatura ideal de queima (SANTOS, 1997).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste estudo é avaliar o comportamento mecânico de concretos convencionais com diferentes porcentagens de substituição do cimento por cinza de casca de arroz, sendo os concretos submetidos a situações de incêndio.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) avaliar os concretos referência e com diferentes substituições do cimento por CCA no estado fresco, por meio do ensaio de abatimento.
- b) determinar qual porcentagem de substituição do cimento por CCA é mais eficiente, observando sua resistência mecânica;

- c) avaliar como o concreto convencional e os concretos com substituição de cimento por CCA resistem em elevadas temperaturas;

1.2 Justificativa da pesquisa

Segundo o Conselho Internacional da Construção (CIB, 2014), o ramo da construção civil é o que mais consome recursos naturais no mundo. Além disso, utiliza consideravelmente energia para a geração de produtos próprios para o uso, por consequência gerando graves impactos ambientais. Outro fator importante é a geração de resíduos sólidos, estima-se que cerca da metade dos resíduos gerados são provenientes da construção civil.

Um dos grandes resíduos oriundos da agroindústria é a cinza de casca de arroz. Este material, quando mal gerenciado, é responsável por grande parte da poluição ambiental. A CCA pode ser encontrada em grandes proporções em locais onde o cereal é bastante cultivado. Estima-se que a cada uma tonelada de arroz colhido são gerados 200 Kg de casca (DE ALMEIDA, 2017).

A CCA está entre os materiais pozolânicos que mais se destacam no ramo da construção civil. Isto é decorrente da excelente melhora na durabilidade e nas propriedades mecânicas que este material gera no concreto. Porém os engenhos de arroz não tem um importante interesse no beneficiamento da CCA, onde a pozolana traz melhores resultados ao concreto estrutural (ISAIA *et al*, 2010).

Este estudo tem como justificativa estabelecer relações que proporcionem um melhor aproveitamento da CCA em concretos, podendo auxiliar na diminuição da poluição ambiental, dando destino a boa parte dos resíduos gerados pela agroindústria de arroz.

Além disso, é necessário conhecer melhor os materiais que são utilizados nos concretos, pois assim podem-se fazer substituições adequadas com relação aos seus constituintes, e dessa forma obter concretos com maior resistência mecânica em situações comuns e de incêndio.

1.3 Estrutura do trabalho

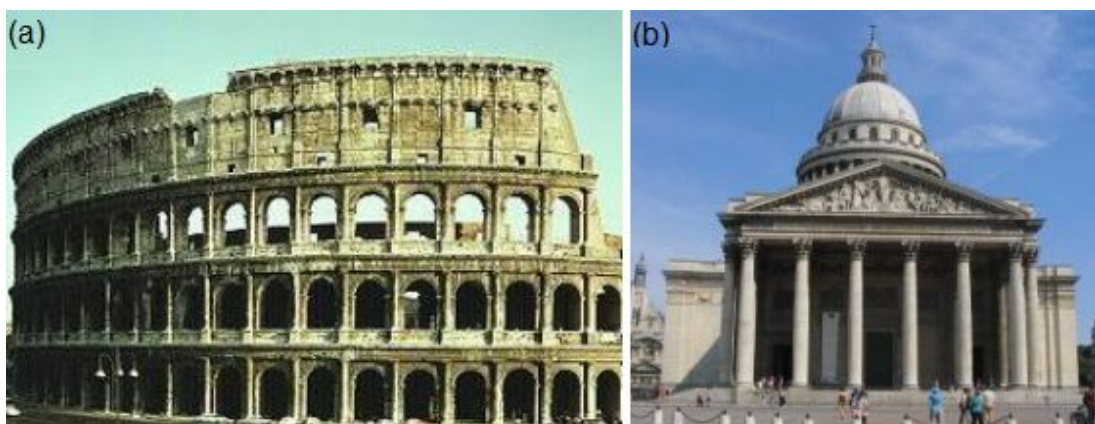
O trabalho está organizado em 6 capítulos. O capítulo 1 é composto pela introdução ao tema e os objetivos propostos. No capítulo 2 é exposta a revisão bibliográfica, onde é discutida a utilização de CCA em concretos e quais as propriedades da mesma. No capítulo 3 é apresentado o programa experimental, onde são indicadas as características de cada material que será utilizado e a forma como os ensaios serão realizados. No capítulo 4 são apresentados os resultados esperados para esta pesquisa. Por fim, as considerações finais são apresentadas no capítulo 5.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materias pozolânicos

As pozolanas já eram utilizadas pelos romanos há cerca de 2000 anos atrás. Junto a elas eram misturadas água e cal. Esta composição foi utilizada em muitas das edificações do Império Romano, entre elas destacam-se o Coliseu, construído de 80 a 70 a.C.¹ (Figura 1a), e o Pantheon (Figura 1b), construído entre os anos de 118 a 126 d.C.² (BARROSO, 2011).

Figura 1 – Edificações do Império Romano



Fonte: Barroso (2011).

Nota: Em (a) o Coliseu e em (b) o Pantheon.

¹ a.C. refere-se aos anos antes de Cristo

² d.C. refere-se aos anos depois de Cristo

Na atualidade, uma das importantes obras da construção civil é a Usina Hidrelétrica de Itaipu (Figura 2), tendo na composição da sua estrutura a pozolana em estudo (BARROSO, 2011).

Figura 2 – Usina Hidrelétrica de Itaipu



Fonte: Itaipu (2020).

De acordo com Mehta *et al.* (2014), o material pozolânico possui propriedades que possibilitam a substituição parcial do cimento e, conseqüentemente, tendo como resultado uma grande vantagem econômica e além de diminuir a emissão de gases na atmosfera.

2.1.1 Definição das pozolanas

Conforme Nita (2006), a atividade pozolânica é o potencial que uma pozolana possui em reagir com o hidróxido de cálcio, isto é, quanto maior a quantidade de hidróxido de cálcio absorvido pela pozolana maior será seu potencial.

Os materiais pozolânicos são normatizados pela NBR 12653 (ABNT, 2015), e segundo a norma a definição de materiais pozolânicos é:

“Materiais silicosos ou sílico aluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes” (NBR 12653, 2015).

Além disso, para formar silicatos estáveis é necessário que o material esteja finamente moído fazendo a combinação com o hidróxido de cálcio e a água. Destaca-se que a sílica no estado cristalino é pouco reativa, contudo, quando está no seu estado amorfo reage de maneira adequada (SILVA, 2005).

As exigências mínimas quanto à composição do material, é determinada pela NBR 12653 (ABNT, 2015), para que deste modo a pozolana seja aceita ou não. Na Tabela 1 podem ser observadas essas propriedades, sendo as pozolanas naturais e artificiais caracterizada pela classe N, já a classe C é caracterizada pelas cinzas volantes e materiais decorrentes da queima do carvão e a classe E são as demais pozolanas que não se enquadram nas classes N e C.

Tabela 1 – Propriedades químicas

Propriedades	Classe do material pozolânico (%)		
	N	C	E
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	> 70	> 70	> 50
SO_3	< 4	< 5	< 5
Teor de umidade	< 3	< 3	< 3
Perda ao fogo	< 10	< 6	< 6
Álcalis disponível em Na_2O	< 1,50	< 1,50	< 1,50

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2015).

As pozolanas podem ser classificadas como naturais ou artificiais. As naturais são aqueles materiais que apresentam atividade pozolânica no estado natural (SILVA, 2005). Por outro lado, as artificiais são argilas submetidas a altas temperaturas para que ocorra a desidratação (MEHTA E MONTEIRO, 2014). A CCA, no qual será utilizada neste estudo, é uma pozolana artificial.

2.1.2 Características e comportamento das pozolanas em Cimento Portland

Em conformidade com Silva (2005), as pozolanas empregadas como incorporação ao cimento auxiliam para um menor calor de hidratação às argamassas e aos concretos, sendo consequência da diminuição da velocidade

inicial de hidratação do cimento causado pela pozolana, logo, a liberação do seu calor de hidratação é reduzida. Outra vantagem é a redução quanto a permeabilidade através do refinamento dos poros, assim auxiliando para uma maior conservação aos ataques químicos.

No momento em que os materiais pozolânicos são combinados junto ao cimento, a sílica e alumina amorfas, presentes nestes materiais, reagem com o hidróxido de cálcio no qual é liberado quando ocorre a hidratação do cimento (BARROSO, 2011).

Por esses motivos, o comportamento das pozolanas reagindo com o cimento geralmente traz resultados satisfatórios, tanto no aumento da resistência como na sua durabilidade. As pozolanas mais utilizadas nesse processo são as naturais e as artificiais como a escória de cobre, argila calcinada, escória de manganês, escória de níquel, terra diatomácea, cinza de bagaço de cana e a CCA que será a pozolana em estudo nesta pesquisa (ABRÃO, 2019).

2.1.3 Cinza de casca de Arroz

Nos últimos anos, a utilização de resíduos em concretos e argamassas vêm sendo motivo para estudos. A CCA é um desses materiais que podem ser utilizados e pode ser um substituto parcial do cimento (PEREIRA, 2008).

A substituição do cimento por CCA é viável e já foi comprovada por diversos estudos. Os resultados são positivos, obtendo-se o aumento de sua durabilidade e resistência mecânica, e, inclusive, economizando na utilização de cimento. Por outro lado, para que esses resultados sejam adequados, dois fatores são primordiais, são eles a temperatura de queima, assim como a moagem da CCA (DUART, 2008).

A CCA precisa ter um controle de queima quando produzida, sendo essa uma das razões limitantes para o seu uso em concretos. O motivo mais relevante é o teor de sílica amorfa, e desse modo, o potencial da sua atividade pozolânica (SANTOS, 1997).

De acordo com Duart (2008), a temperatura de queima da casca de arroz varia entre 500°C e 1100°C, porém, o autor coloca que não existe uma temperatura certa para a queima do material. Após a queima, o material é resfriado naturalmente.

Segundo Pereira (2008), a CCA é um material poroso e pouco duro, por consequência, seu processo de moagem é mais simples e mais econômico do que o do cimento Portland. O autor cita, que para ser utilizado como substituto parcial do cimento é necessário ter partículas variando entre 10 - 75µm, apresentando assim uma ação pozolânica satisfatória. A recomendação sobre a moagem é que a CCA não deve ser moída excessivamente, deixando o material assim muito fino e consequentemente não ficando semelhante ao cimento.

O processo mais comum de moagem forma-se por um tambor rotativo, onde são colocadas esferas metálicas de volumes preestabelecidos (PEREIRA, 2008, apud SOUZA, 2005).

2.1.4 Utilização da CCA em concretos/argamassas

A utilização da CCA em concretos e argamassas pode ser uma grande aliada para a redução da poluição ambiental, e, além disso, para o ganho de resistência em idades mais avançadas, melhorando consequentemente as características do concreto (DUART, 2008). Para Duart (2008), os concretos com substituição parcial do cimento por CCA em diferentes teores (10, 20 e 30%), melhoram a resistência do concreto e a emissão de CO₂ é reduzida consideravelmente.

Outras características foram analisadas com a substituição parcial do cimento por CCA, uma delas é a resistividade elétrica de concretos, que obteve um aumento considerável, sendo justificado pelo refinamento da estrutura porosa (HOPPE, 2005).

Para Santos (1997), em seus estudos realizados com a substituição parcial de CCA por cimento, foram sete diferentes teores de substituição. A moagem da CCA no estudo do autor foi de forma controlada, assim como a queima. Os resultados obtidos por ele estão apresentados na Tabela 2. Avaliando os resultados,

pode-se dizer que o teor de substituição de 15% foi o mais adequado, chegando a uma resistência mecânica de 45,33 MPa em 28 dias de cura.

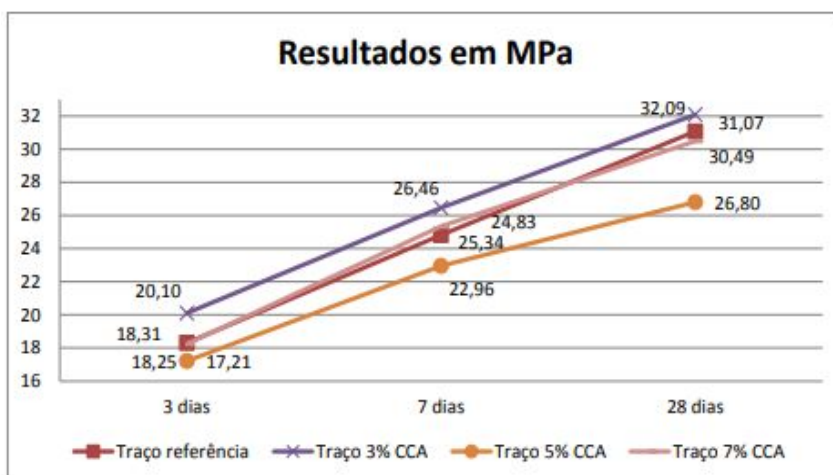
Tabela 2 – Resistência à compressão dos CP aos 28 dias

Teor de cinza (%)	0	5	10	15	20	30	40	50
Resistência Mecânica (MPa)	37,68	39,09	42,40	45,33	40,87	39,72	38,20	35,40

Fonte: Adaptado dos resultados de SANTOS (1997).

Outro estudo sobre a substituição da CCA em concretos foi realizado por Ludwig (2014), onde foi executada a substituição de 0 %, 3%, 5% e 7% da pozolana. Os resultados obtidos estão ilustrados na Gráfico 1, onde o traço com 3% de substituição obtém uma resistência mecânica maior em todas as idades. A cinza utilizada no ensaio mencionado, foi comprada industrialmente, ou seja, sua temperatura de queima e grau de moagem são controlados pelo fabricante.

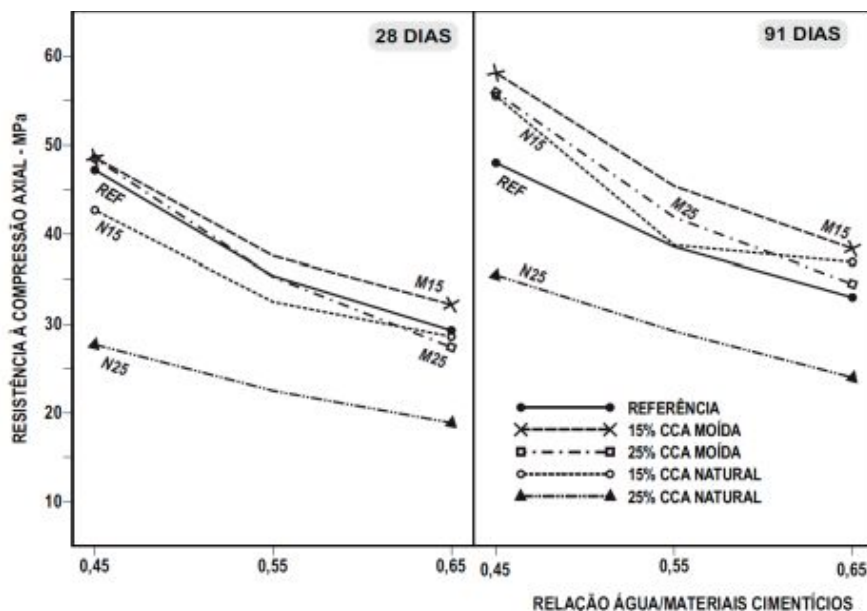
Gráfico 1 – Resistência dos traços de concreto



Fonte: Ludwig (2014).

Conforme estudo realizado por Isaia *et al.* (2010), o Gráfico 2 apresenta os resultados desta pesquisa, onde retrata que os concretos produzidos com CCA moída apresentam uma maior resistência em comparação a CCA natural. Ainda pode-se observar que a porcentagem de substituição que mais ganhou resistência foi a substituição de 15%, para as duas idades de rompimentos realizadas.

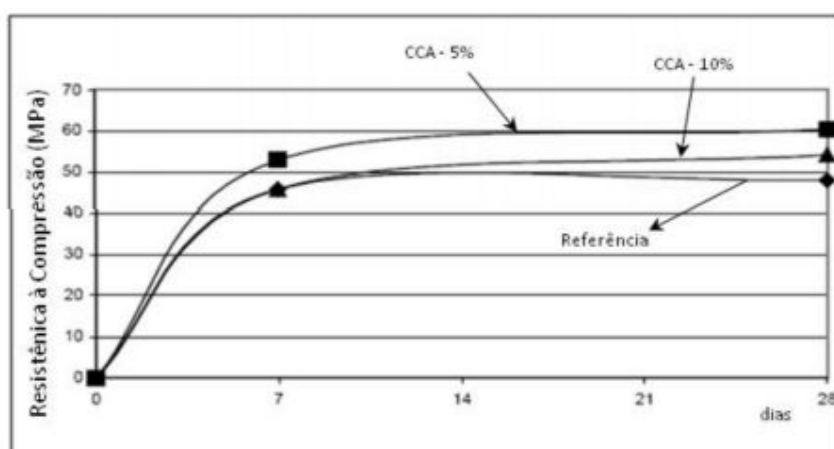
Gráfico 2 – Resistência mecânica aos 28 e 91 dias



Fonte: Isaia *et al.* (2010).

Os dados apresentados por Duarte (2008), mostram que a substituição de cimento por CCA na porcentagem de 5% é mais vantajosa quando ela é utilizada em seu estado natural, ou seja, sem controle de queima e sem moagem. O Gráfico 3 apresenta os resultados desta pesquisa, o traço de referência é o qual está sendo utilizado 100% do cimento.

Gráfico 3 – Resistência do concreto com CCA em estado natural



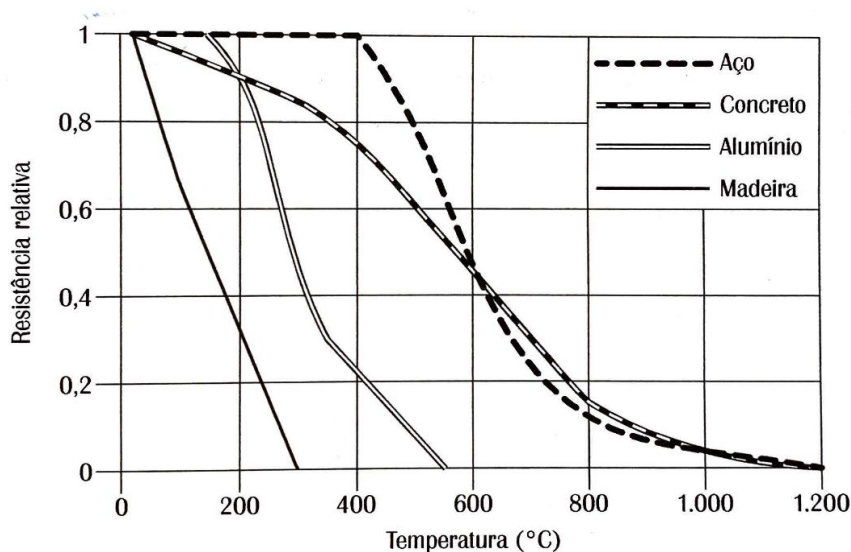
Fonte: Duarte (2008).

2.2 Concretos em situação de incêndio

As estruturas de concreto são caracterizadas pela sua resistência ao fogo ser adequada comparada a outros materiais estruturais. Isso ocorre devido a suas características térmicas, sendo elas baixa condutividade térmica, incombustibilidade. Outro aspecto é referente a sua massa e volume serem maiores comparados a outros elementos estruturais, como os metálicos. Atualmente, algumas características são muito utilizadas na construção de edifícios, uma delas é a redução do fator água/cimento utilizando aditivos e adições, proporcionando maior compacidade e redução da permeabilidade. Individualmente essas características melhoram a durabilidade da estrutura em temperatura ambiente, porém, quando analisada em situação de incêndio, ou seja, em elevadas temperaturas, aceleram a degradação da estrutura (COSTA e SILVA, 2002).

A resistência mecânica quando submetida a situações de incêndio é perdida consideravelmente. O Gráfico 4 demonstra a redução da resistência de cada material estrutural em altas temperaturas (SILVA, 2014).

Gráfico 4 – Resistência de materiais estruturais em elevadas temperaturas



Fonte: Silva (2014).

Segundo Silva (2014), um incêndio pode chegar a mais de 1000 °C, e desta forma, o calor é diretamente transferido para as estruturas da edificação. Para que

isso seja o menos severo, é necessário seguir minuciosamente as normas de proteção em estruturas, para que não se reduza consideravelmente a resistência do concreto e aço em situações de incêndio. Em muitas dessas situações, o concreto serve de proteção para a armadura de aço, assim, o calor irá demorar mais até atingi-las.

2.2.1 Incêndios históricos

Os incêndios são situações que, segundo Silva (2014), podem ser evitadas e, por consequência, pode-se minimizar a probabilidade do mesmo ocorrer. Os principais motivos que levam uma construção a pegar fogo são instalações elétricas realizadas fora do padrão normativo, não ter uma brigada contra incêndio, e ainda a não instalação de chuveiros automáticos.

Para Silva (2014), o primeiro grande incêndio aconteceu em Roma em 19 de julho de 64, como mostra na Figura 3. O fogo em Roma se propagou pela cidade durante 9 dias, e a cidade ficou cerca de 75 % destruída. Outro grande incêndio que marcou a história, foi o ocorrido em Londres no ano de 1666 (Figura 4), no qual mais de 13 mil casas foram queimadas. Em Chicago, no ano de 1871 (Figura 5), houve outro grande incêndio citado pelo autor Silva (2014), no qual ocorreu em área urbana, sendo registrados diversos óbitos.

Figura 3 – Primeiro grande incêndio



Fonte: Domingues (2019).

Figura 4 – Incêndio em Londres



Fonte: End Time Brasil (2016).

Figura 5 – Incêndio em Chicago



Fonte: Arqline (2010).

Um marco importante na história da segurança contra incêndios foi no princípio do século XX, quando ocorreram quatro grandes incêndios no mundo. O primeiro foi o Teatro Iroquois, em Chicago, no ano de 1903. O segundo em 1908, a Ópera Rhoads em Boyertown na Pensilvânia. Nesse mesmo ano, em Cleveland, Ohio, em uma escola ocorreu o incêndio onde morreram 172 crianças e 2

professores. O quarto incêndio foi no Triangle Shirtwaist Company, em Nova York, no ano de 1911. A partir destes ocorridos, em 1914 foi lançada a quinta edição do Manual de proteção contra incêndios, nele foi escrito sobre como as construções deveriam se adequar para que os riscos de incêndios pudessem ser minimizados ao máximo (SILVA, 2014).

No Brasil, assim como no mundo, houveram quatro principais acontecimentos que marcaram a história de incêndios no país. O primeiro deles ocorreu em 1961 no Gran Circo Norte-americano em Niterói, Rio de Janeiro (Figura 6), este acontecimento foi o maior em perda de vidas no país. Em São Paulo, em 1972, ocorreu o incêndio no Edifício Andraus (Figura 7), o primeiro de grandes edifícios. Ainda em São Paulo, no ano de 1974, outro edifício é queimado, o Edifício Joelma, na Praça da Bandeira (Figura 8), tirando a vida de 179 pessoas. O último aconteceu no centro do Rio de Janeiro no ano de 1986, o Edifício Andorinha (Figura 9) provocou 21 mortes.

Figura 6 – Incêndio do Gran Circo Norte-americano



Fonte: Extra Globo (2013).

Figura 7 – Incêndio do Edifício Andraus



Fonte: Nogueira (2020).

Figura 8 – Incêndio do Edifício Joelma



Fonte: Previdelli (2020).

Figura 9 – Incêndio do Edifício Andorinha



Fonte: Site da Vellamo Engenharia e Projetos.

No Rio Grande do Sul, um dos principais incêndios ocorreu na capital do Estado, Porto Alegre, no ano de 1976, o prédio que era ocupado pelas Lojas Renner, pegou fogo, neste episódio 41 pessoas morreram e mais de 60 pessoas ficaram feridas (MAZZONI, 2010).

2.2.2 Comportamento de concretos em situação de incêndio

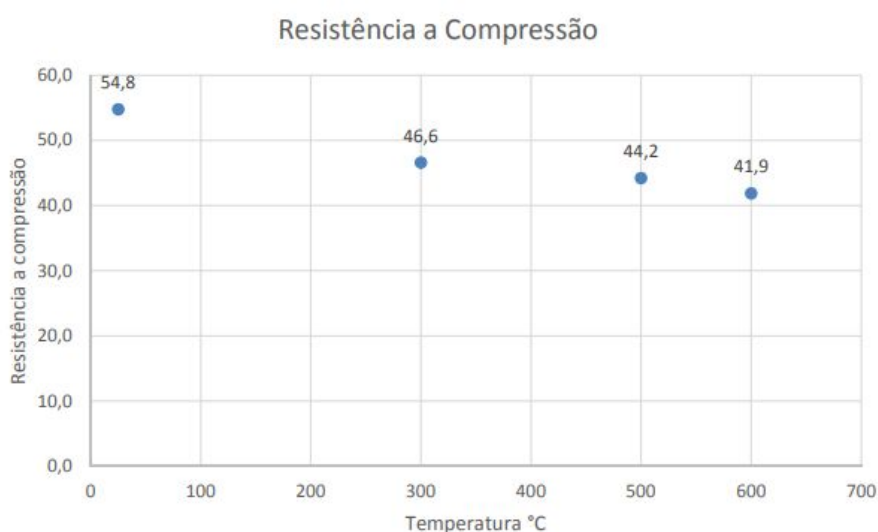
Os concretos não costumam trabalhar com fissuração em situações normais, porém, quando o mesmo é submetido a elevadas temperaturas, como por exemplo em uma situação de incêndio, o mesmo, pela grande diferença de temperatura que ocorre, começa a fissurar e, por consequência, a perder sua resistência. A perda de resistência é gradativa, comumente inicia-se quando a temperatura atinge 300°C tendo uma perda de resistência a compressão de 10%. A perda pode ser ainda maior e chegar a 50% do valor inicial, quando a temperatura chega nos 600°C (DE LIMA, 2005).

Além disso, quando o concreto está exposto a elevadas temperaturas sua coloração é modificada, ficando visivelmente rosa quando as temperaturas estiverem entre 300°C e 600°C, de 600°C até 900°C sua coloração será cinza e a partir deste valor de temperatura sua cor será marrom (SILVA E SILVA, 2016).

Segundo Silva e Silva (2016), os concretos submetidos a testes para estudo de comportamento, em virtude do seu alto aquecimento, podem ter seu resultado influenciado, levando em consideração a forma como foi realizado o ensaio. A conclusão deste estudo poderá ser diferente quando o material é resfriado lentamente ou bruscamente, como geralmente ocorre em situações reais de incêndio.

Conforme Pian e Vargas (2014), em seu estudo ensaiaram a resistência de vigas de concreto armado em elevadas temperaturas, no Gráfico 5 o eixo y apresenta a resistência à compressão e em x a temperatura que foi elevado este concreto, a perda de resistência está em torno dos 25% se comparada a resistência em temperatura ambiente.

Gráfico 5 – Resistência à compressão em elevadas temperaturas



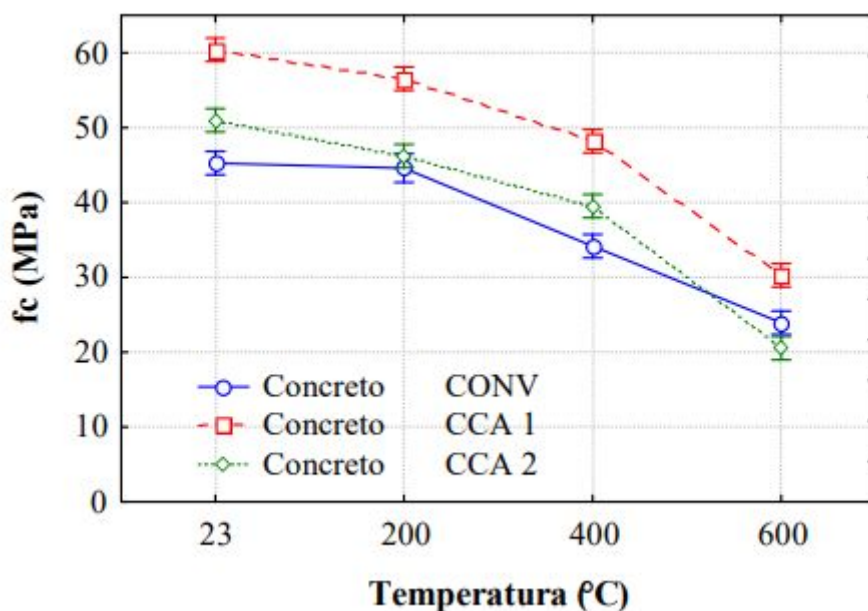
Fonte: Pian e Vargas (2014).

2.2.3 Uso da CCA em concretos em elevadas temperaturas

Nos últimos anos a substituição parcial do cimento por CCA vem sendo alvo de estudos. No Gráfico 6 pode ser observada a resistência do concreto em elevadas temperaturas, onde as curvas são de diferentes porcentagens de substituição. Como pode-se analisar, o concreto convencional obteve uma resistência à compressão menor do que os concretos com substituição de CCA, porém, é notável que quando

submetido a elevadas temperaturas a perda de resistência é menos brusca no concreto convencional. Além disso, nota-se que mesmo o concreto convencional sendo o que menos perdeu resistência, o CCA 1 apresentou uma resistência final melhor em comparação aos outros (DE ALMEIDA *et al.*, 2014).

Gráfico 6 – Resistência do concreto em elevadas temperaturas



Fonte: De Almeida et al. (2014).

Outro estudo executado na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande Do Sul (UNIJUÍ), por De Almeida (2017), apresenta situações onde a CCA é substituída parcialmente no concreto e após é elevada a altas temperaturas. O Gráfico 7 apresenta dados que mostram os CP rompidos e suas resistências em temperaturas ambiente.

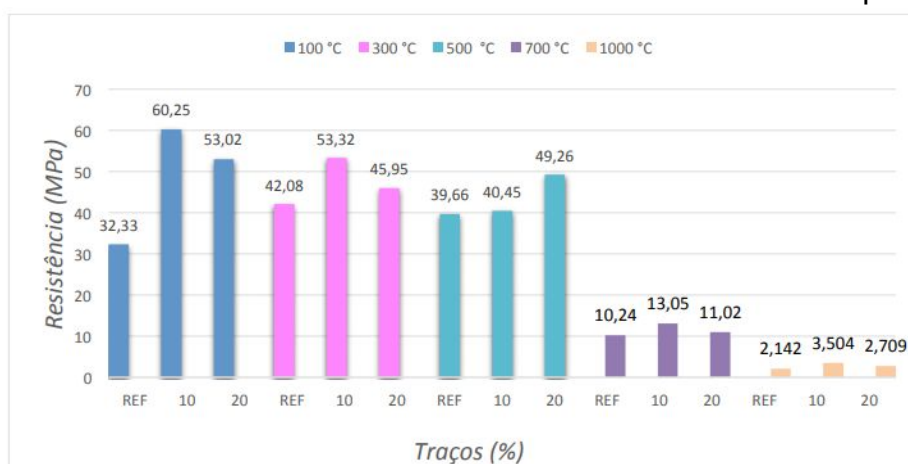
Gráfico 7 – Resistência à compressão da CCA



Fonte: De Almeida (2017).

Os resultados observados no Gráfico 7 podem ser comparados aos do Gráfico 8 onde ilustram-se os mesmos CPs quando foram elevados a altas temperaturas na idade de 56 dias. Constata-se que as resistências à compressão são reduzidas em até 30% no intervalo de temperatura até 500°C, mas continuam apresentando uma boa resistência. A partir desta temperatura, a resistência é diminuída consideravelmente até chegar aos 1000°C, onde ela é quase nula se comparada a inicial (De Almeida, 2017).

Gráfico 8 – Resistência dos CPs com CCA em elevadas temperaturas



Fonte: De Almeida (2017).

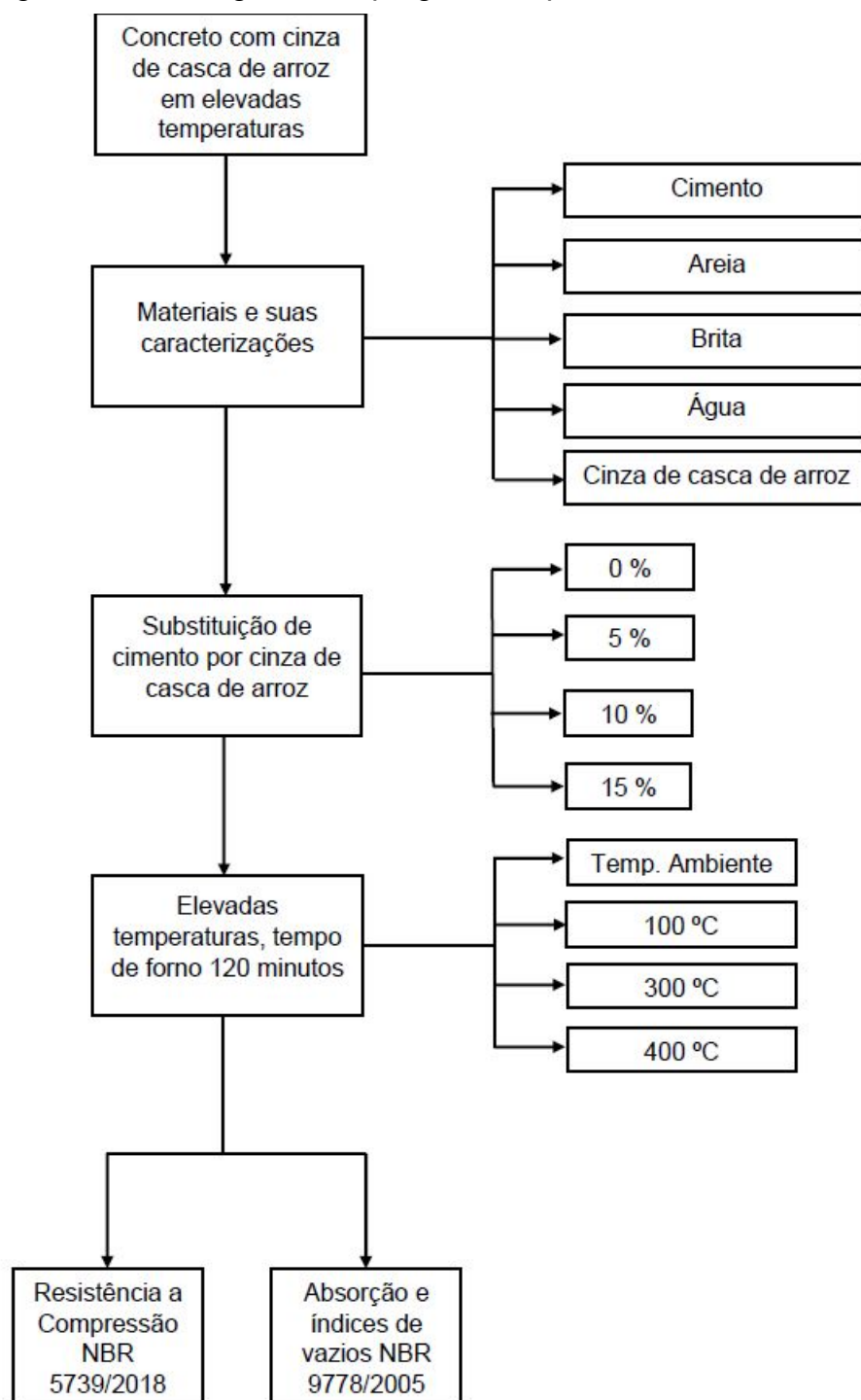
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental foi elaborado para que o principal objetivo desta pesquisa fosse alcançado. Este estudo fundamenta-se em qualificar as características mecânicas do concreto com adição de CCA, substituindo parcialmente o cimento. Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a diferentes temperaturas em um forno mufla, para simular o concreto em situações de incêndio.

3.1 Estratégia de Pesquisa

Os ensaios foram realizados na Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, mais especificamente no Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC). Como está apresentado na Figura 10, foram moldados corpos de prova com substituições parciais do cimento por CCA em proporções de 0, 5, 10 e 15%, esses teores foram baseados no referencial teórico apresentado no item 2. A escolha destas porcentagens de substituição se deu pelos estudos analisados anteriormente, apresentando melhores resultados nesses teores. Todas as amostras foram submetidas a diferentes níveis de temperaturas, sendo elas: temperatura ambiente, 100°C, 300°C e 400°C. Ao final, foram realizados ensaios de caracterização do concreto, sendo eles resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios.

Figura 10 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autor (2020).

3.2 Caracterização dos Materiais

Com o objetivo de desenvolver um concreto para este estudo, foi necessária a utilização de cimento, areia, brita 1 e CCA. Nos subcapítulos seguintes são descritos cada material citado anteriormente.

3.2.1 Cimento

Nessa pesquisa foi utilizado o cimento CP V – ARI, conhecido por sua alta resistência inicial. A escolha deste produto se fez pelo fato de sua resistência ser atingida mais rapidamente em comparação a outras classes de cimento.

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), o CP V – ARI apresenta a resistência de no mínimo 14 megapascals (Mpa) em um dia de cura. A alta resistência deste cimento ocorre devido a este ser extremamente fino e, além disso, por apresentar uma maior quantidade de silicato tricálcico. Com isso os processos de hidratação do cimento ocorrem de forma mais ágil o que implica em ganho acelerado de resistência.

3.2.1.1 Massa específica do cimento

O ensaio para determinação da massa específica do cimento foi realizado utilizando o frasco de Le Chatelier, conforme NBR 16605 (ABNT, 2017). Este ensaio foi realizado com aproximadamente 60 gramas de cimento, como indicado na norma, sendo os volumes V1 e V2 registrados e a massa específica calculada a partir da Equação 1, obtendo-se um valor de 2,99 g/cm³.

$$\rho_c = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde:

ρ_c : massa específica do cimento (g/cm³);

m: massa do cimento (60g);

V: diferença entre V1 e V2 (cm³).

3.2.2 Areia

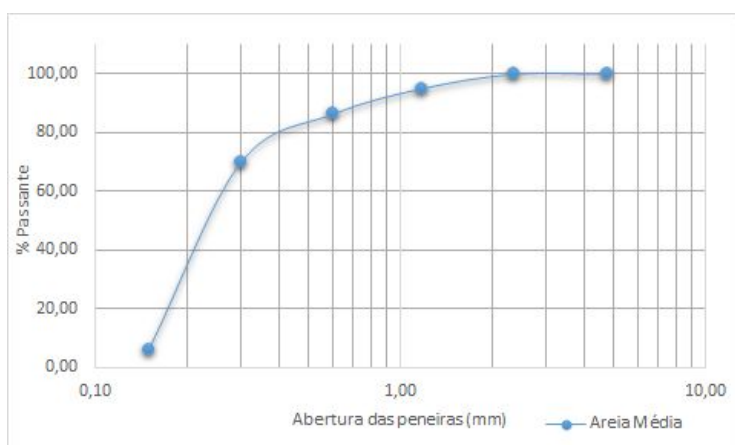
A pesquisa foi realizada com areia de origem natural quartzosa, do tipo média, que foi submetida aos ensaios de granulometria, massa específica e massa unitária. Para isso, foi necessário analisar as normas em vigor, sendo elas a NBR NM 52 (ABNT, 2009) e a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

3.2.2.1 Granulometria da areia

Para este estudo foi necessário realizar o ensaio de granulometria, seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Para a determinação deste parâmetro, a areia estava seca e na temperatura ambiente. Assim, iniciou-se o ensaio nas peneiras de série normal. Após a agitação, o material que ficou retido foi pesado a fim de determinar as porcentagens do retido, retido acumulado e passante nas peneiras, conforme Gráfico 9, para após ser calculado o módulo de finura, a partir da Equação 2. O valor de módulo de finura encontrado foi de 2,4216.

$$M.F = \frac{\text{SOMATÓRIO DA \% RETIDA ACUMULADA NAS PENEIRAS DA SÉRIE NORMAL}}{100} \quad (2)$$

Gráfico 9 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2020).

A partir da Tabela 3 pode-se verificar a classificação da areia, para isso foi necessário ter conhecimento do módulo de finura. No presente estudo a areia utilizada foi classificada como areia média.

Tabela 3 – Limites do módulo de finura

Nomenclatura	Faixa	Módulo de Finura
Muito fina	1	De 1,35 a 2,25
Fina	2	De 1,71 a 2,85
Média	3	De 2,11 a 3,38
Grossa	4	De 2,71 a 4,02

Fonte: Ambrozewicz (2012, p.51).

3.2.2.2 Massa unitária e massa específica da areia

A massa unitária da areia foi obtida através da realização do ensaio descrito na NBR NM 45 (ABNT, 2006), com base no método “C”. Sua massa unitária foi dada pela Equação 3. Após a realização do ensaio e registro dos parâmetros foi obtido o valor de 1,492 g/cm³.

$$\delta = \frac{M_{ar} - M_r}{V} \quad (3)$$

Onde:

δ : massa unitária da areia (g/cm³);

M_{ar} : massa do recipiente e agregado (g);

M_r : massa do recipiente (g);

V : volume do recipiente (cm³).

A massa específica da areia foi obtida através do ensaio apresentado na NBR NM 52 (ABNT, 2009). Para a realização deste, foi utilizada uma amostra de 1 Kg de areia e durante o ensaio registraram-se as massas necessárias. Os dados obtidos

através das pesagens foram inseridos na Equação 4 a fim de encontrar a massa específica da areia a ser utilizada, resultando em 2,60 g/cm³.

$$\rho_a = \frac{m}{(V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_a}) - \frac{m_s - m}{\rho_a}} \quad (4)$$

Onde:

ρ_a : massa específica da areia (g/cm³);

m: massa do agregado seco em estufa (g);

m1: massa do frasco e agregado (g);

m2: massa do frasco, agregado e água (g);

ms: massa do agregado saturado de superfície seca (g);

ρ_a : massa específica da água (g/cm³);

V: volume do frasco (cm³).

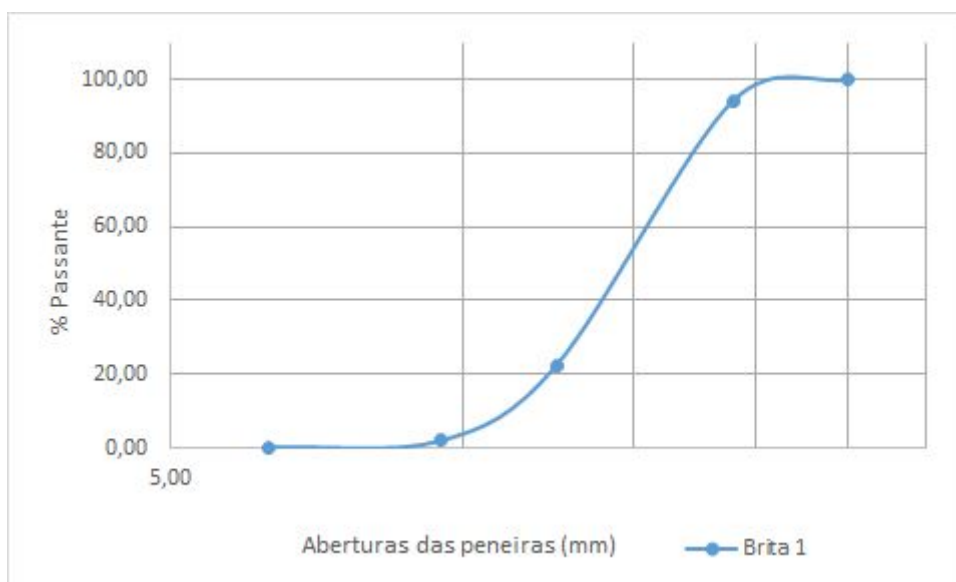
3.2.3 Brita 1

Para este estudo, a brita utilizada foi a brita nº 1. Com o objetivo de obter a sua granulometria, massa unitária e massa específica, foram realizados os ensaios conforme as normas regulamentadoras NBR NM 248 (ABNT, 2003) e a NBR NM 53 (ABNT, 2009).

3.2.3.1 Granulometria da brita 1

Este ensaio foi realizado com duas amostras de brita 1 conforme NBR 248 (ABNT, 2003). O ensaio foi executado da mesma maneira que o agregado miúdo, na Tabela 3 foram colocados os valores retidos em cada peneira. Em seguida, foi realizado o cálculo do módulo de finura para ser determinada a classificação desta brita. Conforme a Equação 2, encontrou-se um módulo de finura de 9,7804.

Gráfico 10 – Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 10, apresenta a porcentagem passante de cada peneira utilizada. A partir da Tabela 4 foi possível analisar a classificação da brita utilizada. Através do diâmetro encontrado no ensaio, de 19 mm, esta brita foi classificada como brita 1.

Tabela 4 – Classificação dos diferentes tipos de brita de acordo com seu diâmetro

Nomenclatura	Diâmetro
Gabião ou rocha de gabião	100 a 150
Brita 0 ou pedrisco	4,8 a 9,5
Brita 1	9,5 a 19
Brita 2	19 a 25
Brita 3	25 a 50
Brita 4	50 a 76
Brita 5	76 a 100
Bica corrida	Diversas Dimensões de 0 a 50
Pó de pedra: finos, alto teor de finos	Finos: 0 a 5
Areia cd brita	Pó de pedra sem partículas abaixo da malha 200

Fonte: Ministério de Minas e Energia MME (2009).

3.2.3.2 Massa unitária e massa específica da brita 1

A massa unitária foi obtida através do ensaio que a NBR NM 45 (ABNT, 2006) apresenta, sendo que o método utilizado foi o “C”. O cálculo da massa unitária foi dado pela mesma Equação 3 já citada anteriormente, onde encontrou-se o valor de 1,369 g/cm³. A massa específica foi obtida através dos parâmetros da NBR NM 53 (ABNT, 2009). Foi necessária uma amostra de brita 1, para que fosse possível calcular sua massa específica. Através da Equação 5, obteve-se o valor de 2,95 g/m³.

$$pb = \frac{m}{m - m_a} \quad (5)$$

Onde:

ρ_b : massa específica do agregado seco (g/cm³);

m: massa da amostra seca (g);

m_a : massa da amostra na água (g).

3.2.4 Cinza de casca de arroz

A CCA a ser utilizada neste estudo foi industrializada, ou seja, adquirida comercialmente, da marca FIDA. Esta foi fabricada na cidade de Pantano Grande/RS. Os dados de caracterização foram obtidos por meio da NBR 16605 (ABNT, 2017), o ensaio foi realizado conforme a norma e está apresentado na Figura 11. Segundo a marca, este material é obtido através da queima da casca de arroz em sistema de combustão sob temperaturas de 500 °C. A Tabela 5 expõe os resultados obtidos da caracterização da CCA.

Figura 11 – Frasco de Le Chatelier



Fonte: Autor (2020).

Tabela 5 – Propriedades da CCA

Propriedades	Resultado
Massa específica (g/cm ³)	2,10
Diâmetro médio (μm)	7,83

Fonte: Autor (2020).

3.3 Dosagem do Concreto

A dosagem do concreto foi realizada a partir do método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), onde o traço é constituído por cimento, areia, brita e relação a/c. A CCA foi utilizada como substituição parcial do cimento nas porcentagens de 0%, 5%, 10% e 15%.

Para a obtenção do traço, foi necessário ter conhecimento das seguintes informações: massa específica e resistência do cimento aos 28 dias, análise granulométrica e massa específica dos agregados, dimensão máxima característica do agregado graúdo, consistência desejada do concreto fresco e resistência de dosagem do concreto.

O traço calculado através do método ABCP, foi de 1:1,96:2,28:0,48, respectivamente cimento, areia, brita 1 e água. As modificações conforme a substituição de CCA estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Traços para cada substituição de CCA

Traço	Cimento	Areia	Brita	A/C	CCA
0% de CCA	1	1,96	2,28	0,48	-
5% de CCA	0,95	1,96	2,28	0,48	0,05
10% de CCA	0,90	1,96	2,28	0,48	0,10
15% de CCA	0,85	1,96	2,28	0,48	0,15

Fonte: Autor (2020).

Com o objetivo de se obter uma quantidade de material para 84 corpos de prova, calculou-se o consumo de cimento para cada traço apresentado, na Tabela 6, com auxílio da Equação 6. Por fim, a quantidade de cada material necessária para concretar os 84 corpos de prova, encontram-se na Tabela 7.

$$Cc = \frac{V}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + a/c} \quad (6)$$

Onde:

Cc: Consumo de cimento;

V: Volume de concreto (L);

γ_c : massa específica do cimento (g/cm³);

a: traço da areia;

γ_a : massa específica da areia (g/cm³);

b: traço da brita

γ_b : massa específica da brita (g/cm³);

a/c: relação de água cimento.

Tabela 7 – Quantidade de material

Traço	Quantidade de material (Kg)					
	Cimento	Areia	Brita	A/C	CCA	Aditivo
0% de CCA	23,49	46,04	53,56	11,28	-	0,100
5% de CCA	15,34	31,66	36,81	7,625	0,80	0,460
10% de CCA	14,48	31,56	36,70	8,13	1,61	0,430
15% de CCA	13,64	31,44	36,58	8,46	2,40	0,410

Fonte: Autor (2020).

A Figura 12 indica os materiais (cimento, areia, brita, água, CCA) já separados para serem colocados na betoneira. A mistura do concreto ocorreu da seguinte maneira: primeiro colocou-se a brita juntamente com uma parte da água na betoneira e deixou-se misturar. Após foi acrescentado o cimento, para então depois serem adicionados a areia e o restante da água. Por fim, todos os materiais foram homogeneizados por cerca de 5 minutos na betoneira fazendo a mistura, para que assim ficasse homogênea.

Figura 12 – Concretagem dos corpos de prova



Fonte: Autor (2020).

Nota: Em (a) materiais para concretagem e em (b) mistura dos materiais.

Os corpos de prova foram moldados a partir de 4 misturas de concreto, totalizando 84 amostras (Figura 13) necessárias para os ensaios do concreto endurecido.

Figura 13 – Corpos de prova concretados



Fonte: Autor (2020).

3.4 Slump Test

O *Slump Test* é a verificação do concreto no estado fresco. A norma que rege este ensaio é a NBR NM 67 (ABNT,1998), e o procedimento acontece da seguinte forma: inicia-se preenchendo o cone disposto em uma base metálica em 3 camadas, sendo que em cada camada é necessário que sejam aplicados 25 golpes, distribuídos uniformemente. Após o cone estar preenchido este é retirado e colocado ao lado do concreto, assim sendo possível verificar a diferença de altura entre os dois. Conforme Figura 14, o valor do ensaio encontrado foi de 10 ± 2 cm.

Figura 14 – *Slump Test*

Fonte: Autor (2020).

3.5 Simulação em altas temperaturas



Os corpos de prova foram colocados no forno Mufla, para que pudessem ser avaliados quanto a sua resistência ao fogo. O forno que foi utilizado está localizado em uma fábrica de joias na cidade de Guaporé, chamada Renomus Joias. Foram colocados 3 corpos de prova de cada traço no forno. As amostras foram elevadas as temperaturas de 100°C, 300°C e 400°C, permanecendo na Mufla da marca JSR Equipamentos, por aproximadamente, 120 minutos após atingirem a temperatura desejada, conforme Figura 15. Esses corpos de prova foram submetidos a ensaio de compressão simples, com rompimentos realizados na idade de 28 dias. Este ensaio foi regido pela NBR 5739 (ABNT,2018).

Figura 15 – Corpos de prova no forno mufla



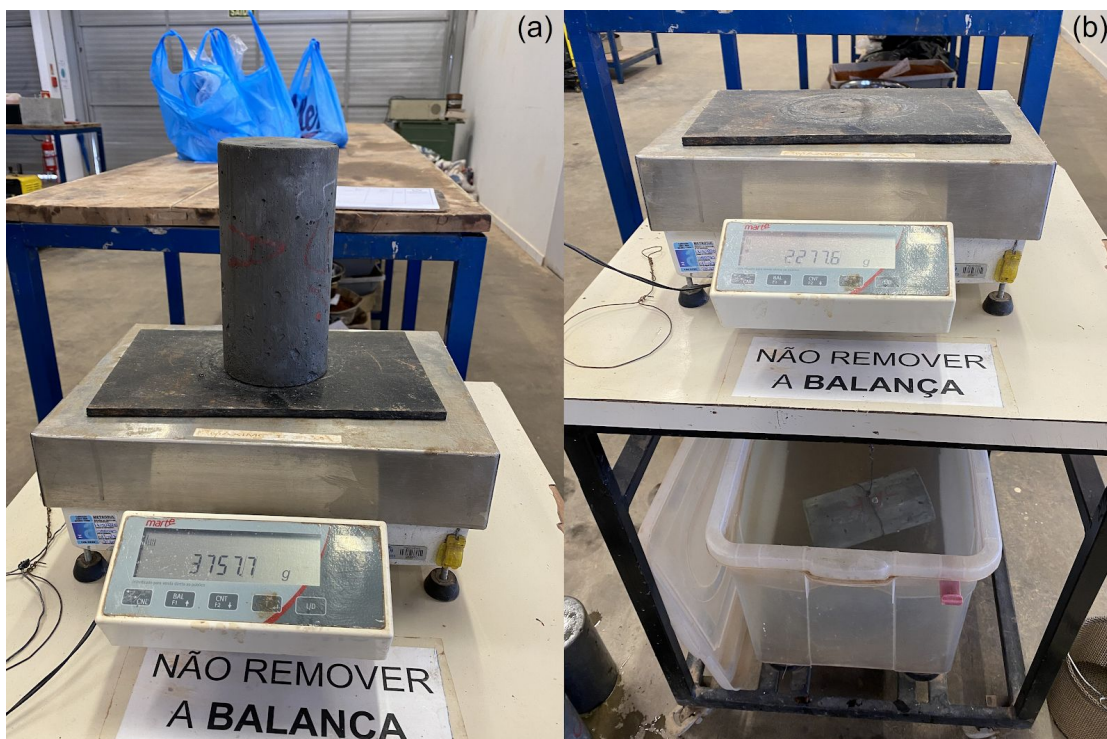
Fonte: Autor (2020).

3.6 Absorção de água e Índice de Vazios

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado conforme a NBR 9778 (ABNT, 2009). Para a execução desse ensaio foram necessários 3 corpos de prova de cada traço na idade de 28 dias. Os corpos de prova foram inseridos na estufa ($105 \pm 5^\circ\text{C}$) pelo tempo de 72 horas. Após esse tempo, estes foram colocadas em imersão em água pelo mesmo período. Logo em seguida, foram introduzidos em uma panela para ferverem pelo período de 5 horas.

Após esses procedimentos, as amostras foram pesadas de duas maneiras distintas, a primeira foi em balança normal, e a segunda foi em balança hidrostática imersa em água, como apresenta a Figura 16.

Figura 16 – Pesagens do ensaio de absorção e índice de vazios



Fonte: Autor (2020).

Nota: Em (a) pesagem em balança normal e em (b) pesagem hidrostática.

O cálculo da absorção de água por capilaridade foi realizado a partir da Equação 7:

$$Ab = \frac{Msat - Ms}{Ms} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

Ab: absorção (%);

Msat: massa do corpo de prova saturado (g);

Ms: massa do corpo de prova seco em estufa (g).

Para o ensaio de índice de vazios foram utilizados os mesmos parâmetros que o ensaio de absorção, porém estes foram inseridos na Equação 8.

$$I = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

I: índice de vazios (%);

M_{sat}: massa do corpo de prova saturado (g);

M_s: massa do corpo de prova seco em estufa (g);

M_i: massa do corpo de prova saturado, porém imerso em água (g).

3.7 Resistência à compressão simples

A norma que estabelece parâmetros para o ensaio à compressão simples é a NBR 5739 (ABNT, 2018). Este ensaio foi realizado com a utilização de uma prensa EMIC modelo SSH300, onde esta comprimiu os corpos de prova até que os mesmos entrassem em colapso. O Laboratório da Tecnologia da Construção (LATEC), da Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES) disponibilizou a utilização da prensa hidráulica, para a obtenção dos resultados da resistência à compressão. Para este estudo foram ensaiados corpos de prova nas idades de 7, 21 e 28 dias.

Os rompimentos desses corpos de prova foram realizados da seguinte forma: 3 corpos de prova de cada traço foram rompidos aos 7, 21 e 28 dias; Aos 28 dias foram rompidos 3 corpos de prova de cada traço sujeitos ao forno mufla em temperatura de 100°C; 3 corpos de prova de cada traço sujeitos ao forno mufla em temperatura de 300°C; e, por fim 3 corpos de prova de cada traço sujeitos ao forno mufla em temperatura de 400°C, totalizando 72 rompimentos para este estudo.

Figura 17 – Rompimento dos corpos de prova com a prensa hidráulica



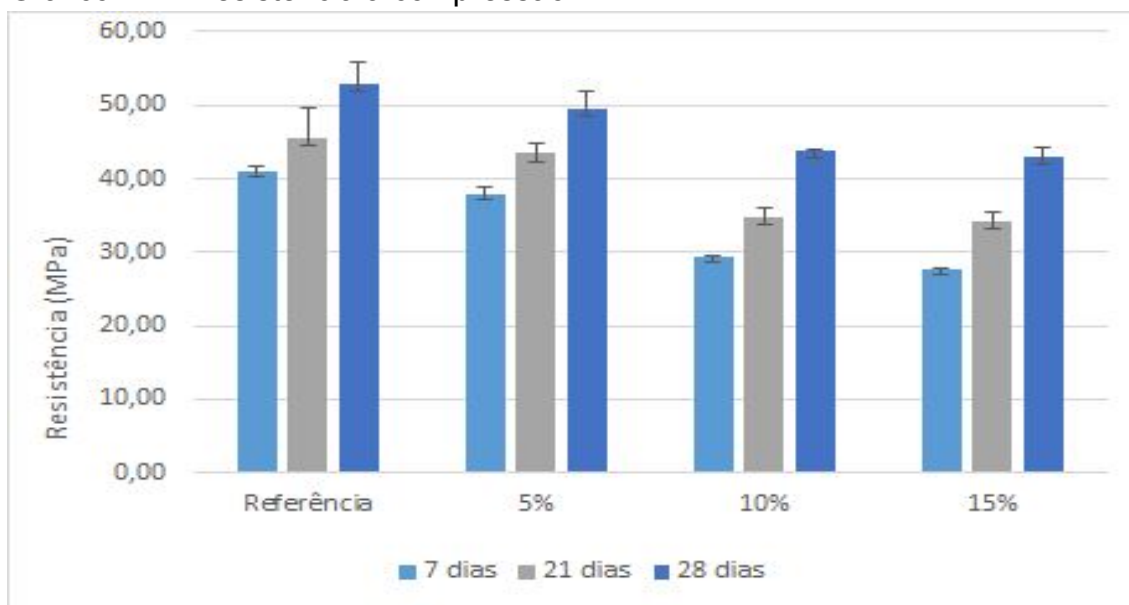
Fonte: Autor (2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão simples estão apresentados no Gráfico 11, correspondendo aos traços referência, com 5%, 10% e 15% de CCA. Seus resultados unitários estão apresentados no Apêndice A.

Gráfico 11 – Resistência à compressão



Fonte: Autor (2020).

O Gráfico 11 apresenta a média e o desvio padrão dos resultados à compressão simples dos concretos com substituição parcial do cimento por CCA. Pode-se observar que a porcentagem de substituição de 5% de CCA

obteve um ganho de resistência aproximadamente igual ao concreto sem substituição.

A Tabela 8 apresenta a resistência à compressão de cada traço, bem como suas reduções comparados ao traço referência. O concreto com 5% de CCA obteve uma diminuição na sua resistência de 7,69% aos 7 dias, aos 21 dias de 4,85% e aos 28 dias de 6,23%. O concreto com 10% de CCA, apresentou redução aos 7 dias de 28,75%, aos 21 dias de 23,75% e aos 28 dias de 16,89%. Por fim, o concreto com 15% de CCA, obteve uma perda de resistência de 32,76% aos 7 dias, aos 21 dias de 24,80% e aos 28 dias de 18,46%.

Tabela 8 – Relação das resistências dos concretos

Traços	Referência		5% CCA		10% CCA		15% CCA	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%
7 dias	41,05	100	37,90	92,311	29,25	71,249	27,60	67,238
21 dias	45,61	100	43,40	95,154	34,78	76,253	34,30	75,201
28 dias	52,77	100	49,48	93,772	43,86	83,109	43,03	81,543

Fonte: Autor (2020).

Foram analisadas também as porcentagens de substituição de 10% e 15% de CCA. Para estas, as resistências obtidas foram muito próximas, nas diferentes idades de cura. Aos 28 dias, notou-se que para as duas porcentagens de substituição, o ganho de resistência foi muito maior se comparado às outras idades, não mantendo a linearidade. Após 7 dias, este ganho foi de aproximadamente 10 MPa, aproximadamente 10 MPa em 7 dias.

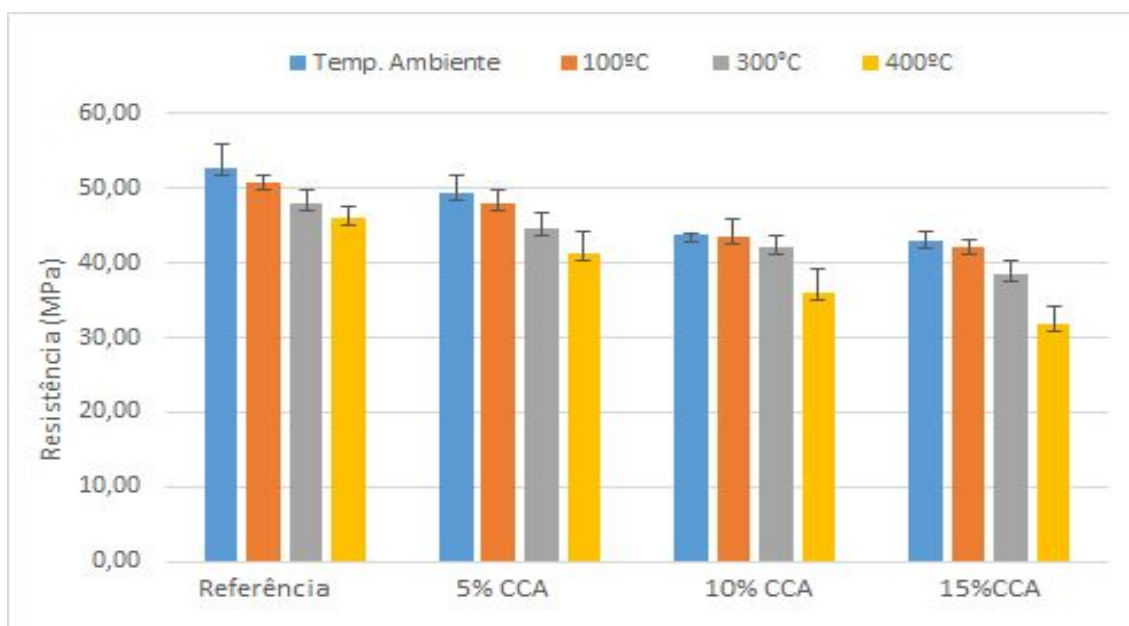
Segundo os dados obtidos por De Almeida (2017), o concreto que mais ganhou resistência foi o com substituição de 10% de CCA. Já os resultados deste estudo indicaram que o traço de 5% de CCA foi o que obteve uma resistência mais próxima ao traço referência. Outro estudo, realizado por Da Silva (2019), apresentou um resultado de resistência maior no traço de

substituição de 15% de CCA, assim seu resultado é diferente do estudo em questão. Essa diferença de resultados pode ser ocasionada pela forma como a casca de arroz foi queimada e após moída, para ser transformada em CCA.

4.2 Resistência em situações de incêndio

Os resultados da resistência à compressão para os corpos de prova que foram submetidos a situações de incêndio estão apresentados no Gráfico 12 e em valores unitários no Apêndice A.

Gráfico 12 – Resistência à compressão dos corpos de prova submetidos a situações de incêndio



Fonte: Autor (2020).

Os resultados apresentados no Gráfico 12, são referentes às médias e desvio padrão das resistências à compressão dos corpos de prova submetidos às temperaturas de 100°C, 300°C e 400°C em forno mufla. Observa-se que quanto maior foi a porcentagem de substituição, maior foi a perda de resistência se exposto ao fogo.

Em temperaturas menos elevadas, como as de 100°C e 300°C os traços mantiveram suas resistências com perdas máximas de aproximadamente 10%, o que comprova que a estrutura não sofreria graves consequências.

Outra condição que foi analisada foi que quando os corpos de prova ficaram expostos à temperatura de 400°C por 120 minutos, o traço referência continuou perdendo resistência, mas de uma forma mais linear. Já para o traço com 5% de CCA observou-se uma perda maior se comparado ao traço sem CCA, porém este foi o traço que mais se aproximou dos resultados alcançados pelo traço sem adição de CCA.

Aos 400°C, o traço com 5% de CCA obteve uma perda de resistência de 16,32%. Se comparado às demais porcentagens, é uma perda considerável, porém aceitável, pois este foi exposto por 120 minutos a uma temperatura elevada. O traço de 10% de CCA aos 400°C perdeu cerca de 17,92% de sua resistência inicial. Já o traço com 15% de CCA, foi o que apresentou maior perda de resistência mecânica, de cerca de 25,93%.

Conforme a Tabela 9, tem-se a relação das resistências de acordo com a exposição a altas temperaturas. Observa-se que, o traço referência em temperatura ambiente obteve 52,77 MPa, equivalente a 100% de sua resistência. Já aos 100 °C, encontrou-se 96,406% da resistência à compressão em temperatura ambiente. Quando submetidos a 300°C, os corpos de prova alcançaram 91,09% da resistência, e aos 400°C, 87,127% da resistência em temperatura ambiente. Da mesma forma, estão apresentados os valores para os demais traços: 5% CCA, 10% CCA e 15% CCA respectivamente, expondo quais foram seus danos com o aumento da temperatura.

Tabela 9 – Perda de resistência mecânica dos corpos de prova

Traços	Temp. Ambiente		100°C		300°C		400°C	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%
Referência	52,77	100	50,87	96,406	48,067	91,087	45,98	87,127
5% CCA	49,48	100	47,92	96,847	44,56	90,051	41,41	83,678
10% CCA	43,86	100	43,53	99,263	42,147	96,101	36,00	82,078
15% CCA	43,03	100	42,13	97,901	38,463	89,387	31,87	74,072

Fonte: Autor (2020).

Segundo o estudo realizado por De Almeida (2017), verificou-se que as perdas de resistência em temperaturas de 100°C e 300°C são similares às expostas neste estudo. Aos 500°C comparou-se a temperatura de 400°C neste estudo, a variação foi de cerca de 10%. Além disso, notou-se que as quedas de resistência à compressão são similares, sendo maiores em concretos com CCA do que os sem adição em temperaturas mais elevadas.

A Figura 18 mostra o aspecto das amostras submetidas a temperaturas de 100, 300 e 400°C. Realizou-se também uma comparação entre estas e os corpos de prova que não foram expostos a elevadas temperaturas.

Figura 18 – Corpos de prova em temperatura ambiente, 100°C, 300°C e 400°C



Fonte: Autor (2020).

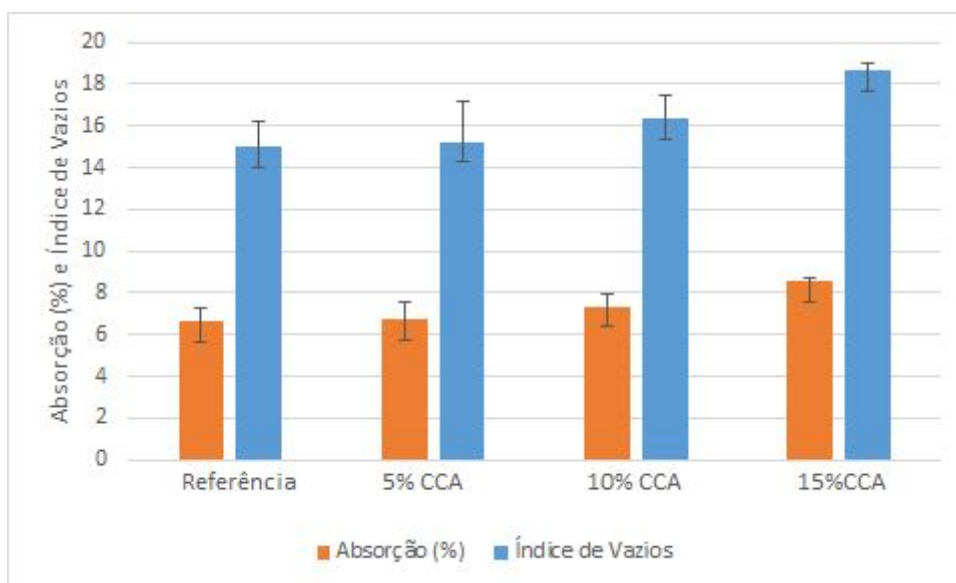
Nota: Em (a) corpos de prova em temperatura ambiente, em (b) corpos de prova submetidos a 100°C, em (c) corpos de prova submetidos a 300°C e em (d) corpos de prova submetidos a 400°C.

Analisando os corpos de prova e comparando-os com os da Figura 18a, pôde-se perceber que aqueles que foram submetidos a temperatura de 100°C (Figura 18b), permaneceram fisicamente intactos. Os expostos aos 300°C (Figura 18c), percebe-se que sua coloração já está mais amarelada se comparado aos que permaneceram em temperatura ambiente, sem apresentar trincas ou rachaduras visíveis. Já aos 400°C (Figura 18d), nota-se que a coloração amarelada do concreto está mais aparente, apresentando ainda uma maior expansão, e conseqüentemente algumas fissuras nos concretos.

4.3 Absorção de água e índice de vazios

Os resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios estão apresentados no Gráfico 13. Pela média dos valores encontrados, e juntamente seu desvio padrão, os valores unitários desse ensaio são encontrados no Apêndice B.

Gráfico 13 – Absorção de água e índice de vazios



Fonte: Autor (2020).

Conforme o Gráfico 13, pôde-se perceber o aumento dos valores de absorção de água e índice de vazios, onde o traço com 5% de CCA foi o que mais se aproximou dos valores do traço referência. Já no traço com 10% CCA a diferença ficou em menos de 1% para a absorção de água e o índice de vazios permaneceu em 1,36, sendo pouco considerável esta diferença.

No traço com 15% de CCA foi o que mais observou-se aumento nos valores de absorção de água e índice de vazios. Se comparado ao traço referência a diferença entre os valores foi de 1,88% para absorção de água e 3,70 para o índice de vazios.

Comparando os resultados obtidos neste estudo, com os apresentados por Da Silva (2019), os concretos com CCA da mesma forma apresentaram uma absorção de água maior, assim como, os resultados para índice de vazios, se comparado ao concreto referência, sendo a substituição de 15% a que apresentou maior variação nos valores destas propriedades.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os diferentes concretos foram avaliados, utilizando os ensaios de simulação em altas temperaturas em forno mufla, resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios. Percebeu-se que os concretos com 5% de CCA atingiram uma resistência aproximadamente igual ao concreto sem CCA. Notou-se também que conforme aumentava-se a porcentagem de substituição, o ganho de resistência era maior na idade de cura de 28 dias.

Quando esses concretos foram submetidos ao forno mufla, percebeu-se que foram perdendo resistência, para ambos os traços. O concreto com 5% de CCA permaneceu com a queda de resistência similar ao concreto sem CCA. Além disso, conseguiu-se ver que os concretos com 10% e 15% de CCA tiveram uma queda maior em sua resistência se comparado ao puro.

Analisando os traços com substituição, o que melhor se adequou foi o de 5%, pois conseguiu manter aproximadamente a mesma resistência do concreto sem CCA e após submetido a elevadas temperaturas conseguiu manter a mesma queda de resistência quando comparado ao concreto sem CCA. A resistência à compressão na temperatura mais elevada para o traço sem substituição ficou em 45,98 MPa e para o traço com 5% de CCA ficou em 41,41 MPa, sendo esta uma variação pequena de 4,57 MPa.

Os ensaios de absorção de água e índice de vazios de maneira geral mostraram pouca diferença nos resultados entre os diferentes traços, porém o que

mais se aproximou do concreto sem substituição foi o traço com 5% de CCA, mantendo uma diferença menor que 1% para absorção e de menos de 1 para o índice de vazios.

Em suma, pode-se dizer que o concreto com 5% de CCA manteve aproximadamente a mesma resistência do concreto sem CCA, enquanto os demais traços apresentaram resultados inferiores. Da mesma forma, quando submetidos a elevadas temperaturas, o concreto com 5% de CCA apresentou resultados parecidos ao do traço sem substituição.

REFERÊNCIAS

ABRÃO, Pedro Cesar Rodrigues Alves. **O Uso de Pozolanas como Materiais Cimentícios Suplementares: Disponibilidade, Reatividade, Demanda de Água e Indicadores Ambientais**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-26032019-084557/publico/PedroCesarRodriguesAlvesAbraoCorr19.pdf>>. Acesso em: abr. 2020.

ALMEIDA, Andressa Tais Loro De. **Análise do Concreto Produzido com Cinza de Casca de Arroz e a Influência Sob Altas Temperaturas**. Universidade Regional Do Noroeste Do Estado Do Rio Grande Do Sul – UNIJUÍ, 2017. Disponível em: <<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/4689>>. Acesso em: abr. 2020.

ALMEIDA, Jacinto Manuel Antunes de; SILVA, Bruno do Vale; SOUZA, Felipe Basquiroto de; FILHO, Luiz Carlos Pinto da Silva. Avaliação Experimental de Concretos com Cinza de Casca de Arroz Submetidos à Ação das Altas Temperaturas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON, 56º, 2014, Natal, Rio Grande do Norte. **Anais...** Natal, 2014, 14 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281348243_Avaliacao_experimental_de_concretos_com_cinza_de_casca_de_arroz_submetidos_a_acao_das_altas_temperaturas>. Acesso em: mai. 2020.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. São Paulo: Pini, 2012. 459 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. **ABNT NBR 12653:** Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. **ABNT NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. 1ª ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. **ABNT NBR 7211:** Agregados para concreto- Especificação. Versão corrigida. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

_____. **ABNT NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Versão corrigida. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR NM 45:** Agregados- Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

_____. **ABNT NBR NM 52:** Agregado miúdo- Determinação da massa específica, massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR NM 53:** Agregado graúdo- Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **ABNT NBR NM 67:** Concreto- Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

_____. **ABNT NBR NM 248:** Agregados- Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BARROSO, Tais Ribeiro. **Estudo da Atividade Pozolânica e da Aplicação em Concreto de Cinzas do Bagaço de Cana-de-Açúcar com Diferentes Características FísicoQuímicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, 2011. Disponível em: <<http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-civil/wp-content/uploads/sites/3/2015/09/Tha%C3%ADs-Ribeiro-Barroso.pdf>>. Acesso em: mar. 2020.

CIB em Resumo. **International Council for Research and Innovation in Building and Construction,** Canadá. Disponível em: <<http://www.pcc.usp.br/latinamericancib/>>. Acesso em: abr. 2020.

COSTA, Carla; SILVA, Valdir. Estruturas de Concreto Armado em Situação de Incêndio. In: Jornada Sul-Americana de Engenharia Estrutural, XXX., 2002, Brasília, Distrito Federal. **Anais...** Brasília, 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Valdir_Silva/publication/229002452_Estruturas>

_de_concreto_armado_em_situacao_de_incendio/links/542d371e0cf277d58e8cb7f9.pdf>. Acesso em: mar. 2020

DOMINGUES, Joelza Ester. **Nero E O Grande Incêndio De Roma**. Disponível em: <https://ensinarhistoriajoelza.com.br/nero-e-o-grande-incendio-de-roma/>. Acesso em: mar. 2020.

EXTRA GLOBO. **Incêndio na boate Kiss, em Santa Maria, pode ser o segundo maior da história no Brasil depois da tragédia do Gran Circo Americano em Niterói**. Disponível em: <https://extra.globo.com/noticias/brasil/incendio-na-boate-kiss-em-santa-maria-pode-ser-segundo-maior-da-historia-no-brasil-depois-da-tragedia-do-gran-circo-americano-em-niteroi-7408875.html>>. Acesso em: mai. 2020.

ESCOLA de Chicago. **Arqline's Blog**, 05 out. 2010. Disponível em: <https://arqline.wordpress.com/2010/10/05/escola-de-chicago/>>. Acesso em: 09 mai. 2020.

FOTOS. **Itaipu Binacional**, Foz do Iguaçu, PR. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/fotos>>. Acesso em: mar. 2020.

HOPPE, Tiago Fernandes. Resistividade **Elétrica de Concretos Contendo Diferentes Teores de Cinza de Casca de Arroz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal d Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Santa Maria – UFSM, Santa Maria, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7671/TIAGO%20HOPPE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: mar. 2020.

ISAIA, G., GASTALDINI, A., ZERBINO, R., SENSALÉ, G., GIACCIO, G., BATIC, O., CURUTCHET, B., PREVOSTI, C., CERVO, T. Viabilidade do Emprego de Cinza de Casca de arroz natural em Concreto Estrutural. Parte II: Propriedades da Durabilidade. In: CONGRESO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGÍA Y RECUPERACIÓN DE ESTRUCTURAS – CINPAR, VI., 2010, Córdoba, Argentina. **Anais...** Córdoba, 2010, 20p. Disponível em: http://www.edutecne.utn.edu.ar/cinpar_2010/Topico%203/CINPAR%20081.pdf>. Acesso em: abr. 2020.

LIMA, Rogerio Cattelan Antochaves de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, 2005, UFRGS. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/5085> >. Acesso em: abr 2020.

LONDRES e o Incêndio de 1666 AD. **End Time Brasil**, 28 jan. 2016. Disponível em: <<https://endtimebrasil.wordpress.com/2016/01/28/londres-e-o-incendio-de-1666-ad/>>. Acesso em 09 mai. 2020.

MAZZONI, Filipe. **Simulação Computacional de Incêndios: Aplicação no Caso do Condomínio Edifício Cacique em Porto Alegre – RS**. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/26041/000755481.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: out. 2020.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA MME. Agregados para construção civil. 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P22_RT30_Perfil_de_brita_para_construcao_civil.pdf/01c75ac7-ecd2-4d85-a127-3ecddec2a31>. Acesso em 17 mar 2019.

NEVILLE, Adam M. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookmann, 2013. Disponível em: <<http://www.univates.br/biblioteca/e-books-minha-biblioteca?isbn=9788582600726>>. Acesso em: mar. 2020.

NITA, Clovis. **Utilização de Pozolanas em Compósitos de Cimento reforçados com Fibras de Celulose e PVA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-24032006-111305/publico/Mestra doNitaClovis.pdf>>. Acesso em: mai. 2020.

NOGUEIRA, André. Há 48 anos, o Edifício Andraus pegava fogo — dois anos antes do acidente do Joelma. **Aventuras na História**, São Paulo, 24 fev. 2020. Disponível em: <<https://aventurasnahistoria.uol.com.br/noticias/reportagem/ha-48-anos-o-edificio-andraus-pegava-fogo-dois-anos-antes-do-acidente-joelma.phtml>>. Acesso em: 09 mai. 2020.

PEREIRA, Inês Grijó. **Cinza de Casca de Arroz – Uma Adição Sustentável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59639/1/000129451.pdf>>. Acesso em: mar. 2020.

PREVIDELLI, Fabio. Há 46 anos, o Edifício Joelma era alvo do maior incêndio acidental em um arranha-céu. **Aventuras na História**, São Paulo, 01 fev. 2020. Disponível em:

<<https://aventurasnahistoria.uol.com.br/noticias/reportagem/historia-incendio-do-edificio-joelma.phtml>>. Acesso em: 10 mai. 2020.

SANTOS, Silvia. **Estudo da Viabilidade de Utilização de Cinza de Casca de Arroz Residual em Argamassas e Concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/111909>>. Acesso em: mar. 2020.

SANTOS, Silvia. **Produção e Avaliação do Uso de Pozolana com Baixo Teor de Carbono Obtida da Cinza de Casca de Arroz Residual para Concreto de Alto Desempenho**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88861/227966.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: mar. 2020.

SILVA, Guilherme Jorge Brigolini. **Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/911M.PDF>>. Acesso em: mai. 2020.

SILVA, Rúbia Tanísa. **Estudo da Durabilidade de Concretos com a Substituição do Cimento por Cinza de Casca de Arroz sob Ação De Sulfatos**. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari – Univates, Lajeado, 2019. Disponível em: <<https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/2561/1/2019RubiaTanisadaSilva.pdf>>. Acesso em: out. 2020.

SILVA, Valdir Pignatta. **Segurança Contra Incêndio em Edifícios** - Considerações para o Projeto de Arquitetura. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2014. v. 1. 129p.

SILVA, Julyanna Bueno V. da; SILVA Reginaldo Virgílio da. Comportamento da Microestrutura do Concreto em Situação de Incêndio. **Revista FLAMME – Revista Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco**, v.2, n. 03, p. 233-236, edição de jan. a jun. 2016. Disponível em: <https://e0d7bd2c-8e8c-49d8-b8d1-a3128f6947c7.filesusr.com/ugd/08765e_f68a725c4dff4e2abc81e4fbdefecd44.pdf>. Acesso em: abr. 2020.

VELLAMO ENGENHARIA E PROJETOS. **Os 12 Maiores Incêndios Do Brasil: Existe Algo Em Comum?** Disponível em: <<https://www.vellamo.eng.br/noticias/os-maiores-incendios-do-brasil>>. Acesso em: mar. 2020.

APÊNDICE A – RESISTÊNCIA DOS CORPOS DE PROVA À COMPRESSÃO SIMPLES E SUBMISSÃO AO FORNO MUFLA

Tabela 10 – Resistência à compressão simples aos 7, 21 e 28 dias

Traço	7 dias	21 dias	28 dias
Referência	41,57	49,82	49,36
	41,29	45,38	53,46
	40,3	41,62	55,49
Média	41,05	45,61	52,77
Desvio Padrão	0,66726	4,10470	3,12271
5% CCA	37,87	44,96	51,38
	37,06	41,87	50,26
	38,76	43,36	46,81
Média	37,90	43,40	49,48
Desvio Padrão	0,8503	1,5453	2,3819
10% CCA	29,63	33,32	43,88
	28,84	35,74	43,98
	29,28	35,27	43,71
Média	29,25	34,78	43,86

Conclusão

Traço	7 dias	21 dias	28 dias
Desvio Padrão	0,395854	1,283212	0,136504
15% CCA	27,78	34,86	44,44
	27,22	35,18	42,29
	27,81	32,85	42,36
Média	27,60333	34,29667	43,03
Desvio Padrão	0,332315	1,263025	1,221597

Fonte: Autora (2020).

Tabela 11 – Resistência dos corpos de prova submetidos ao forno mufla

28 Dias	Ref.	5% CCA	10% CCA	15% CCA
Temperatura Ambiente	49,36	51,38	43,88	44,44
	53,46	50,26	43,98	42,29
	55,49	46,81	43,71	42,36
Média	52,77	49,48	43,86	43,03
Desvio Padrão	3,12271	2,38194	0,13650	1,22160
100°C	51,89	45,71	46,22	43,12
	50,73	49,52	41,39	41,12
	50	48,54	42,99	42,14
Média	50,87	47,92	43,53	42,13
Desvio Padrão	0,9531	1,9784	2,4604	1,0001
300°C	49,94	43,45	42,97	36,71
	46,84	47	40,51	40,19
	47,42	43,23	42,96	38,49

28 Dias	Ref.	5% CCA	10% CCA	15% CCA
Média	48,06667	44,56	42,14667	38,46333
Desvio Padrão	1,64807	2,115963	1,417404	1,740153
400°C	47,29	43,71	39,73	31,7
	44,19	38,39	34,07	34,34
	46,45	42,12	34,19	29,58
Média	45,97667	41,40667	35,99667	31,87333
Desvio Padrão	1,603288	2,730794	3,233718	2,384729

Fonte: Autora (2020).

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios

Traço		Ms (g)	Msat (g)	Mi (g)	Absorção (%)	Índice de Vazios
Referência	A	3713,4	3972,8	2316,9	6,99	15,67
	B	3712,2	3975,0	2308,8	7,08	15,77
	C	3723,7	3946,6	2296,9	5,99	13,51
Média		3716,4	3964,8	2307,53	6,68	14,98
Desvio Padrão					0,61	1,28
5% CCA	A	3541,7	3756,1	2196,9	6,05	13,75
	B	3717,9	4001,6	2335,2	7,63	17,02
	C	3589,8	3820,9	2242,0	6,44	14,64
Média		3616,5	3859,53	2258,03	6,71	15,14
Desvio Padrão					0,82	1,69
10% CCA	A	3647,2	3914,9	2274,3	7,34	16,32
	B	3620,0	3906,5	2264,6	7,91	17,45
	C	3551,3	3794,0	2204,1	6,83	15,27
Média		3606,2	3871,8	2247,67	7,36	16,34
Desvio Padrão					0,54	1,09

Continua

Conclusão

Traço		Ms (g)	Msat (g)	Mi (g)	Absorção (%)	Índice de Vazios
15% CCA	A	3608,0	3924,1	2264,5	8,76	19,05
	B	3629,4	3937,5	2274,3	8,49	18,52
	C	3508,3	3804,7	2200,4	8,45	18,48
Média		3581,9	3888,8	2246,4	8,57	18,68
Desvio Padrão					0,17	0,32

Fonte: Autora (2020).



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09